

# Ultrarövid impulzusok terjedésének vizsgálata fotonikus kristály szálakban és szállézerekben a közeli infravörös tartományban

Fekete Júlia

Doktori értekezés tézisei

Témavezető:

Szipőcs Róbert, PhD

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Fizika Doktori Iskola

Doktori iskola vezetője: Horváth Zsolt, egyetemi tanár

Statistikus fizika, biológiai fizika és kvantumrendszerek fizikája doktori program

Programvezető: Kürti Jenő, egyetemi tanár

Budapest, 2009.

## Bevezetés

Doktori munkám során ultrarövid fényimpulzusok optikai szálban való terjedésével foglalkoztam. Az ultrarövid impulzusok terjedését többek között meghatározza a diszperzió és a nemlinearitás. Ez utóbbi az optikai szálakban nagyságrendekkel jelentősebb lehet, mint a nem-száloptikai elemekben egy lefókuszált nyaláb esetében, mivel a fény-anyag kölcsönhatási hosszuk jóval nagyobb. Ezáltal új vizsgálati módszerek nyíltak a nemlineáris optikában. Ugyanakkor az optikai szálakban alacsony veszteséggel továbbíthatók jelek nagy távolságon keresztül úgy, hogy közben a jel alakja kontrollálható módon változik. Az optikai szálak ennek köszönhetően annyira elterjedtek az utóbbi évtizedekben, hogy mára a kutatás és technika szinte minden területén jelen vannak.

A nemlinearitás és a diszperzió a mag és az azt körülvevő köpeny szerkezetének megfelelő kialakításával az úgynevezett fotonikus kristály szálakban jelentős mértékben változtatható. Ezeket a szálakat különböző adalékolású üvegek és levegő illetve egyéb gázzal töltött üregek alkotják.

Az ultragyors lézeroszcillátorok kimenetén kialakult impulzusoknak az üvegszálak és más optikai elemek anyagi diszperziója miatt a közeli infravörös tartományban a különböző spektrális komponensei eltérő késleltetést szenvednek, ezáltal időben kiszélesednek. A további alkalmazásokhoz a diszperziót kompenzálni kell, ami megoldható fotonikus kristály szálak segítségével. A diszperzió-kompenzálás során célszerű figyelembe venni, hogy mekkora a kompresszált impulzus csúcsintenzitása. Nagy intenzitás esetén ugyanis a nemlinearitás hatására modulálódhat, széteshet az impulzus. Ez elkerülhető és a diszperzió hatékonyan kompenzálható légmagos fotonikus kristály szálak alkalmazásával. Ebben az esetben a nemlinearitás azáltal csökkenthető, hogy az energia nagy része a levegő magban koncentrálódik, amelynek a nemlineáris együtthatója elenyésző.

Ultragyors folyamatok vizsgálatához gyakran a meglevő impulzusok hosszának rövidítésére van szükség. Az impulzus minimális hosszát a Fourier-transzformációs kapcsolat miatt a jel spektruma határozza meg. Ahhoz, hogy ennél rövidebb időalakat kapjunk, a spektrum kiszélesítését kell megoldani, ami valamely nemlineáris folyamat révén valósítható meg.

Az ultrarövid impulzusok előállításának az utóbbi időben egyre népszerűbb módja, hogy maga a fényforrás is optikai szálakból áll és lehetőleg az összes optikai elem szálintegrált, az optikai pumpáláshoz pedig ennek megfelelően szálkimenettel ellátott lézerdiódákat használnak. A szállézereknek előnye a hagyományos szilárdtest

lézerekkel szemben a kompakt elrendezés, alacsony előállítási és fenntartási költség, a felhasználók általi könnyű kezelhetőség, valamint a környezeti hatásokkal szembeni stabilitás. Az 1  $\mu\text{m}$  körüli hullámhossz tartományon a teljesen szálintegrált oszcillátorokkal korábbi eredmények szerint előállított impulzusok rezonátoron kívüli kompresszió után nem rövidebbek néhány 100 fs-nál.

## Célkitűzések, alkalmazott módszerek

A légmagos fotonikus kristály szálak a köpeny 'tiltott-sáv' szerkezetének köszönhetően vezetik a fényt a magban, amelynek a teljes belső visszaverődés elvén működő szálakkal ellentétben alacsonyabb a törésmutatója, mint a köpeny átlagos törésmutatója. Elméletben a légmagos szálak vesztesége a tiltott-sávban kisebb, mint az üvegmagos szálaké a szórási folyamatok miatt, a gyakorlatban elkészített légmagos szálak átvitele mégsem éri el más szálak átvitelét, ráadásul a tiltott-sávon belül találhatók nagy veszteségű tartományok. A légmagos úgynevezett Bragg fotonikus 'bandgap' szálak gyakorlati megvalósításához szükség van a közel koncentrikusan elhelyezkedő levegő rétegek között üveg távtartó-rudakra, melyek azonban veszteségi mechanizmusok fellépését eredményezik. Itt megkülönböztethető a szimmetria megfontolásokból adódó felületi módusok által okozott veszteség és az úgynevezett szívárgó módusok. Egydimenziós Bragg-szerkezetekkel vont analógia alapján megvizsgáltuk, hogy a szívárgó módusok milyen veszteségi mechanizmust képviselnek. Célunk volt ez alapján szívárgó módus mentes légmagos Bragg fotonikus 'bandgap' szálak tervezése.

A kis magátmérőjű optikai szálakban nagy intenzitás esetén fellépő önfázis-moduláció az impulzus időbeli intenzitás függvényével arányos nemlineáris fázistolás révén kiszélesíti és modulálja a spektrumot. Ultrarövid impulzusok esetén viszonylag kis impulzusenergiánál elérhető megfelelő önfázis-moduláció. A diszperziós és nemlineáris fázistolások egyidejű figyelembe vételével, a terjedés modellezésével és optimalizálásával kiszélesíthető a spektrum, és kompresszálható az impulzus. Célom ennek kísérleti igazolása volt.

További célunk volt egy teljesen szálintegrált, itterbium alapú módusszinkronizált lézeroszcillátor kifejlesztése, melynek impulzusai minél rövidebbre, legfeljebb néhány 100 fs-ra kompresszálhatók. A kísérleti megvalósításon kívül az impulzusok karakterizálásával célunk volt annak meghatározása is, hogy mi a lézerműködés mechanizmusa.

# Eredmények

## 1. tézis

A dielektromos fotonikus 'bandgap' szerkezetek tervezésére javasoltunk egy eljárást, sűrűlódó beesésnél való alkalmazásokhoz [T1]. Az elméleti háttér az egydimenziós vékonyréteg szerkezetek elmélete adja, melyet egy- és kétdimenziós szerkezetek tervezéséhez is felhasználtunk. Különböző típusú sík dielektrikum tükrök viselkedését hasonlítottam össze, és lézertükrökként való alkalmazáshoz a sűrűlódó beesésre tervezett egydimenziós fotonikus 'bandgap' szerkezeteket javasoltam. Az egydimenziós eredményeket alapul véve, kiterjesztettük a modellt kétdimenziós szerkezetekre, és alkalmaztuk azt a légmagos Bragg fotonikus 'bandgap' szálak tervezéséhez. A valós légmagos Bragg fotonikus 'bandgap' szálakban fellépő szivárgó módusok jelenlétének okait vizsgáltam, és kimutattam, hogy azokért a távtartó-rudak által okozott megnövekedett törésmutató a felelős. Meghatároztam szivárgó módus mentes szerkezeteket, és az egydimenziós modell eredményeit összehasonlítottuk a kétdimenziós, távtartó-rudakat is figyelembe vevő véges elem módszer eredményeivel. A szimulációs eredményekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az egydimenziós modell jó becslést ad szivárgó módus mentes légmagos Bragg fotonikus 'bandgap' szálak tervezésére. Ezáltal egy hatékony kiegészítő módszert képvisel a bonyolult és időigényes teljes-hullám megoldó módszerekhez.

## 2. tézis

Ultrarövid impulzusoknak a Fourier-transzformáció által megszabott határnál rövidebbre való kompresszálása a nemlineáris spektrális kiszélesítéssel oldható meg. 1 nJ és az alatti impulzusenergiák esetén ezt kis magátméretű fotonikus kristály szálban való terjedéssel értük el. Számítógépes optimalizálás segítségével meghatározott fázisviszonyok alapján a közel transzformáció-limitált 24 fs-os impulzusok kétszeres kompressziójának kísérleti megvalósítását végeztem el [T2].

## 3. tézis

Egy passzív módusszinkronizált, itterbium alapú teljesen szálintegrált ring-oszcillátort fejlesztettünk ki, mely diszperzió-kompensálás nélkül, az úgynevezett teljesen normál diszperziójú tartományban működik, 1.03  $\mu\text{m}$  hullámhosszon. A lézer pikoszekundumos impulzusokat generál, amelyeket a rezonátoron kívül elhelyezett rácspá-

rokkal közel 200 fs-ra kompresszáltunk [T3]. Megvizsgáltuk az impulzusok tulajdonságait a rezonátor több pontján, hogy jobban megismerjük a normál diszperziós tartományban működő módusszinkronizált száloszcillátorok működésének fizikai alapjait. Megállapítottuk, hogy az általunk fejlesztett oszcillátorban az impulzus-formálás folyamatát az optikai szálban fellépő nemlineáris polarizáció változás és egy polarizáló elem által megvalósított spektrális és időbeli szűrés határozza meg.

## Publikációk

### Doktori tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [T1] J. Fekete, Z. Várallyay, R. Szipőcs, „Design of high bandwidth one- and two-dimensional photonic bandgap dielectric structures at grazing incidence of light,” *Applied Optics* **47**, 5330-5336 (2008).
- [T2] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, R. Szipőcs, „Optimizing input and output chirps up to the third-order for sub-nanojoule, ultra-short pulse compression in small core area PCF,” *Applied Physics B* **86**, 567-572 (2007).
- [T3] J. Fekete, A. Cserteg, R. Szipőcs, „All-fiber, all-normal dispersion ytterbium ring oscillator,” *Laser Physics Letters* **6**, 49-53 (2009).

### A dolgozat témájában megjelent egyéb publikációk

- [T1.1] J. Fekete, Z. Várallyay, R. Szipőcs, „Design of leaking mode free hollow-core photonic bandgap fibers,” in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2008), paper JWA4.
- [T2.1] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression in small core area photonic crystal fibers below the zero dispersion wavelength,” *Trends in Optics and Photonics* **98**, 571-576 (2005).
- [T2.2] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, S. Lakó, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression down to 6 fs in photonic crystal fibers,” *CLEO Europe*, Munich, Germany, June, 2005.
- [T2.3] R. Szipőcs, J. Fekete, Á. Bányász, Z. Várallyay, „Pulse Compression with Highly Nonlinear Photonic Crystal Fibers by Optimization of Input and Output Chirp Parameters up to the Third-Order,” in *Optical Amplifiers and Their*

- Applications*, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005), paper ME6.
- [T2.4] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, S. Lakó, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression down to 6 fs in photonic crystal fibers,” *CLEO/QELS Conference*, Baltimore, Maryland, USA, May 22-27, 2005, paper JThE21.
- [T2.5] Z. Várallyay, J. Fekete, Á. Bányász, S. Lakó, R. Szipőcs, „Sub-nanojoule pulse compression down to 6 fs in photonic crystal fibers,” *Advanced Solid State Photonics Conference*, Vienna, Austria, February 6-9, 2005, paper WD2.
- [T3.1] Fekete J., Csérteg A., Szipőcs R., „Módusszinkronizált, normál diszperziójú szálintegrált itterbium ring oszcillátor,” *Kvantumelektronika konferencia*, Budapest, 2008.